

論文 含浸接着樹脂の物性値が RC 梁のせん断耐力に及ぼす影響

鈴木 将充^{*1}・伊藤 正憲^{*2}・牧 剛史^{*3}・加藤 佳孝^{*4}

要旨: エポキシ樹脂および性質が異なる 2 種類の水硬性樹脂を用いて、含浸接着樹脂の物性値が連続繊維シートにより補強された RC 梁のせん断耐力に及ぼす影響について検討した。その結果、付着および接着強度があまり期待できなくとも、継手強度が確保されていれば設計計算値よりも安全側に評価できることが実験的に明らかとなった。これにより、せん断耐力の向上を目的とした場合、含浸接着樹脂の特性として、継手強度が樹脂の性能を代表する物性値となる可能性が示唆された。

キーワード: 水硬性樹脂, 連続繊維シート, せん断耐力, 継手強度

1. はじめに

阪神・淡路大震災以降、その甚大な被害を鑑み、コンクリート構造物の耐震補強が進められ、首都圏の主要交通機関や緊急輸送道路の耐震補強はほぼ完了している。しかし、地震の規模によっては、倒壊等の大被害に至らないまでも中小被害を受ける構造物が、未だ多く存在している¹⁾。損傷した構造物は、余震に対する安全性、構造物の機能性の確保を目的として応急復旧する必要がある²⁾が、既往の復旧技術は施工が大掛かりであり、また効果発現までに日数を要するものが多く、頻発する余震に対応できない可能性が高い。このような背景の下、被災後に迅速に対応ができ、安全でかつ簡易に施工可能な復旧工法の開発が望まれている。そこで、著者らは医療用ギプスをアイデアの起源とし、損傷した RC 構造物に対し、水硬性樹脂が含浸された連続繊維シートを巻き立てた後、給水するだけで補修効果が得られる新しい迅速復旧工法を開発している³⁾。

連続繊維シートを用いてせん断補強する場合、含浸接着樹脂としてエポキシ樹脂を用いるのが一般的である。これは、エポキシ樹脂が高分子材料の中でも非常に高性能であること、さらに、数多くの施工実績により信頼性が高いことによる⁴⁾。そのため、これまでに多くの研究機関で連続繊維シートを用いたせん断補強法やせん断補強効果に関する研究が行われた^{5)~7)}が、エポキシ以外の含浸接着樹脂を用いた事例は少ない。既往の研究では、解析的検討により、シートとコンクリート間の接着層の力学特性が構造特性に影響を及ぼすことは明らかとされている⁸⁾が、含浸接着樹脂の特性がせん断補強に及ぼす影響を実験的に検討した例はほとんど無い。

本研究は、水硬性ポリウレタン樹脂の、連続繊維シート巻立て工法の含浸接着樹脂としての適用の可能性を

検討するとともに、含浸接着樹脂の物性値が連続繊維シートにより補強された RC 梁のせん断耐力に及ぼす影響について実験的に検討した。なお、含浸接着樹脂は、従来用いられるエポキシ樹脂および性質が異なる 2 種類の水硬性ポリウレタン樹脂(以下、HPR-A, HPR-B)の計 3 種類を使用した。

2. 実験概要

2.1 含浸接着樹脂

本研究で用いたエポキシ樹脂(粘度: 20000 mPa・s at 20°C)は、二液混合型の連続繊維シート接着用である。水硬性ポリウレタン樹脂(粘度: 35000~45000 mPa・s at 25°C)は、一液硬化性であり、水と接触することで反応・硬化が始まり、それに伴い炭酸ガスを発生する。原液のままでは粘性が高く扱いが困難であるため、HPR-A はグリコールエステル系溶剤により、HPR-B は反応性モノマーによりそれぞれ希釈して使用した。なお、希釈剤の影響により、HPR-A はウレタン特有の柔軟性を有しているが、HPR-B は硬い塗膜を形成するためゴム弾性を有していないという異なる性質を持っている。

2.2 含浸接着樹脂の物性値

各含浸接着樹脂の物性値を把握するため、道路・鉄道で連続繊維を用いた補修補強指針に用いられている各種試験を実施した。含浸接着樹脂の塗布量は、エポキシ: 0.8kg/m², HPR-A: 0.45kg/m², HPR-B: 0.85kg/m²とした。含浸接着樹脂の塗布方法は、エポキシの場合、プライマー塗布→樹脂下塗り→シート貼付け→樹脂上塗り、HPR の場合、シートに樹脂含浸→シート貼付けの手順で行った。なお、試験に用いた連続繊維シートは、アラミド繊維シート(公称値, 目付量: 280g/m², 引張強度 2060N/mm², 弾性率 1.18×10⁵)で統一した。

*1 東急建設(株) 土木技術部 土木研究室 修(工) (正会員)

*2 東急建設(株) 土木技術部 土木研究室 博(工) (正会員)

*3 埼玉大学大学院 理工学研究科 環境科学・社会基盤部門 准教授 博(工) (正会員)

*4 東京大学 生産技術研究所 准教授 博(工) (正会員)

表-1 試験体諸元

試験体 No.	有効高さ d (mm)	スパン a (mm)	a/d	軸方向鉄筋		せん断補強筋		連続繊維シート種類	樹脂種類
				材質径	鉄筋比 (%)	材質径	鉄筋比 (%)		
1	300	900	3	SD490 D29	3.06	SD295A D6	0.15	-	-
2								アラミド	エポキシ
3									HPR-A
4									HPR-B

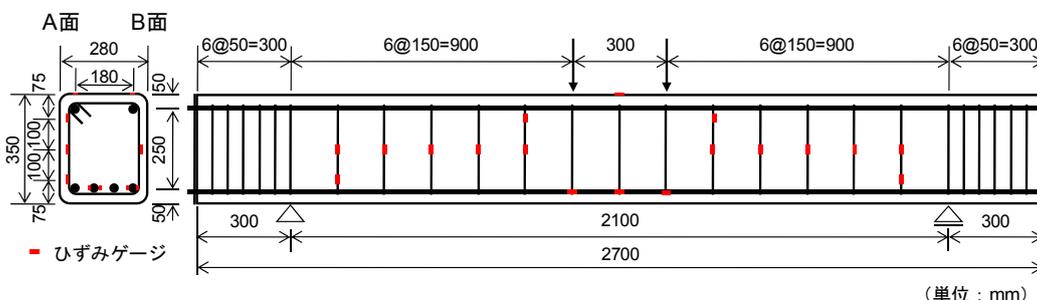


図-1 試験体寸法

表-2 材料試験結果

コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)	
No.1	32.5	2.43×10 ⁴	
No.2	30.6	2.35×10 ⁴	
No.3	33.5	2.45×10 ⁴	
No.4	32.5	2.43×10 ⁴	
鉄筋	降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
軸方向鉄筋 SD490 D29	523	677	1.87×10 ⁵
せん断補強筋 SD295A D6 (0.2%offset)	349	506	1.82×10 ⁵
連続繊維シート	含浸樹脂	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
アラミド 目付量 280g/m ²	エポキシ	2610	1.28×10 ⁵
	HPR-A	2460	1.44×10 ⁵
	HPR-B	2660	1.43×10 ⁵

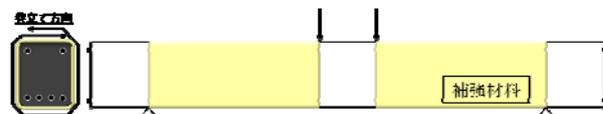


図-2 補強試験体

を 150mm, 200mm, 250mm の 3 種類とし, JSCE-E 542-2007 に準拠して試験を行った。

継手強度 f_{fus} は式(3)により算出した。

$$f_{fus} = \frac{F_u}{A} \quad (3)$$

ここに, f_{fus} : 継手強度(N/mm²), F_u : 最大引張荷重(N),

A : 供試体の断面積(mm²)

(3) 付着試験

付着試験は, JSCE-E 543-2007 に準拠して供試体の作製および試験を行った。供試体は, 分離型コンクリートブロック(断面 100mm×100mm, 長さ 400mm)に連続繊維シートを付着長 200mm となるように調整し貼り付け, 7日間気中(20℃, RH60%)にて養生した後, 試験を行った。

界面剥離破壊エネルギー G_f および付着強度 τ_u はそれぞれ式(4), (5)により算出した。

$$G_f = \frac{P_{max}^2}{8b^2 \cdot E_f \cdot t} \quad (4)$$

ここに, G_f : 界面剥離破壊エネルギー(N/mm), P_{max} : 最大荷重(N), b : 連続繊維シート幅の平均値(mm), E_f : 連続繊維シートの弾性係数(N/mm²), t : 連続繊維シートの厚さ(mm)

$$\tau_u = \frac{P_{max}}{2b \cdot l} \quad (5)$$

ここに, τ_u : 付着強度(N/mm²), b : 連続繊維シート幅の平均値(mm), l : 連続繊維シートの試験部分における有効付着長(mm)

(1) 引張試験

供試体は, 幅 12.5mm, 全長 200mm の試験片に樹脂を含浸させ, 7日間気中(20℃, RH60%)にて養生し作製した。試験は, 両端に長さ 50mm の鋼製のタブを接着し, JSCE-E 541-2007 に準拠して行った。

引張強度 f_{tu} および弾性係数 E_f はそれぞれ式(1), (2)により算出した。

$$f_{tu} = \frac{F_u}{A} \quad (1)$$

ここに, f_{tu} : 引張強度(N/mm²), F_u : 最大引張荷重(N),

A : 供試体の断面積(mm²)

$$E_f = \frac{\Delta F}{\Delta \varepsilon \cdot A} \quad (2)$$

ここに, E_f : 弾性係数(N/mm²), ΔF : 最大引張荷重の 20% と 60% における 2 点間の荷重の差(N), $\Delta \varepsilon$: 同上 2 点間のひずみの差, A : 試験体の断面積(mm²)

(2) 継手試験

供試体の寸法などは引張試験と共通であるが, 継手長

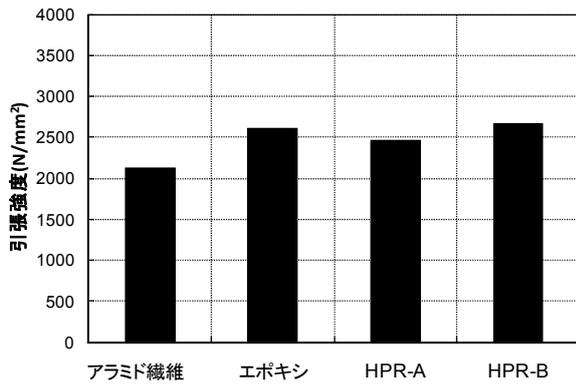


図-3 引張強度

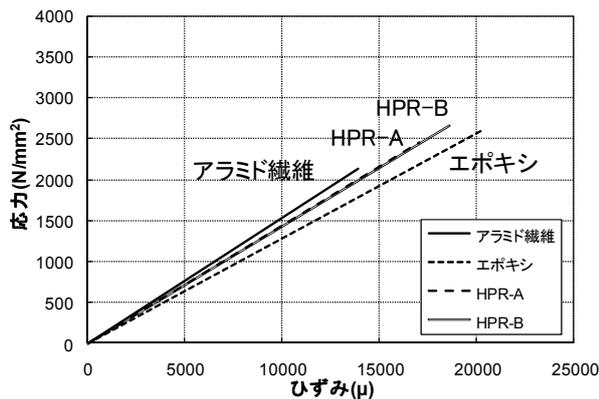


図-4 応力-ひずみ関係

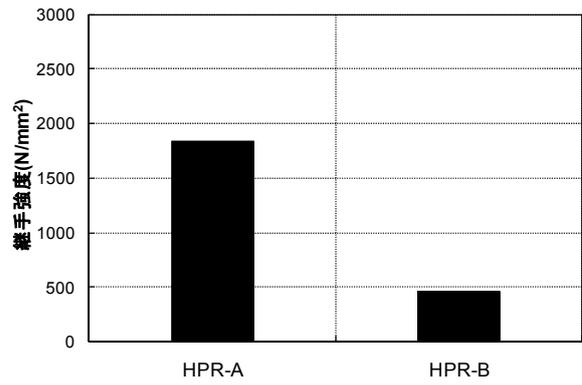


図-5 継手強度(継手長 200mm)

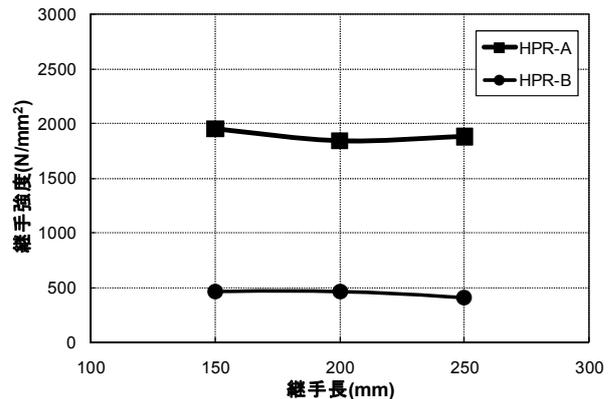


図-6 各継手長の継手強度

(4) 接着試験

接着試験は、コンクリート平板(300mm × 300mm, 厚さ 60mm)に連続繊維シートを貼り付け, 7日間気中(20℃, RH60%)にて養生後, 表面にエポキシ樹脂を用いて鋼製治具(40mm × 40mm)を接着し, 試験を行った。

接着強度 f_{au} は, 式(6)により算出した。

$$f_{au} = \frac{F_{au}}{A_s} \quad (6)$$

ここに, f_{au} : 接着強度(N/mm²), F_{au} : 最大荷重(N),

A_s : 鋼製治具の面積(mm²)

2.3 梁載荷試験

試験体寸法を図-1, 試験体緒元を表-1, 材料試験結果を表-2 に示す。試験体は, 連続繊維シートが受け持つせん断耐力を算定するため, 巻立て後もせん断破壊が先行するように設計した。実験は, 連続繊維シートをせん断スパンに1層巻き立て, 梁上面にて200mmの継手長を設け補強を行い(図-2), 7日間養生した後, 載荷した。

載荷方法は, 2点集中の単調載荷とし, 支点は試験体の回転変形および軸方向変形を拘束しないよう移動および回転支持とした。また, 目視によるひび割れの観察を行うとともに, 荷重, 鉛直変位, 軸方向鉄筋ひずみ, せん断補強筋ひずみ, 連続繊維シートひずみを適宜測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 含浸接着樹脂の物性値

(1) 引張試験

引張強度を図-3, 応力-ひずみ関係を図-4 に示す。なお, 樹脂の影響を把握するために, 樹脂を含浸させずに連続繊維シートのみでの試験も行った。各樹脂を含浸させた場合, 引張強度はほぼ同様の結果が得られたが, 弾性係数はエポキシとHPRで若干異なり, エポキシが低く, HPRが高くなることが確認された。アラミド繊維のみを試験した場合, 樹脂を含浸させた場合と比較し, 引張強度および終局ひずみは低下し, 弾性係数は高くなる結果が得られた。これは, シート間に樹脂が存在しないことにより, 繊維間の応力が不均一な状態で伝達されたためと考えられる。これらの結果より, 引張強度は連続繊維シートの性能に依存するが, 弾性係数は樹脂の影響を受けると考えられた。

(2) 継手試験

継手長200mmの継手強度を図-5, 各継手長における継手強度を図-6 に示す。なお, エポキシは継手部で破壊が観察できなかったため引張強度を継手強度とした。HPR-Aの場合, 継手強度は引張強度を下回ってはいるが, 破壊形態がシート破断のものがほとんどであった。一方, HPR-Bの場合, 継手強度はHPR-Aの1/4程度と極めて低く, 破壊形態はすべて継手部破壊であった。また, 150mm

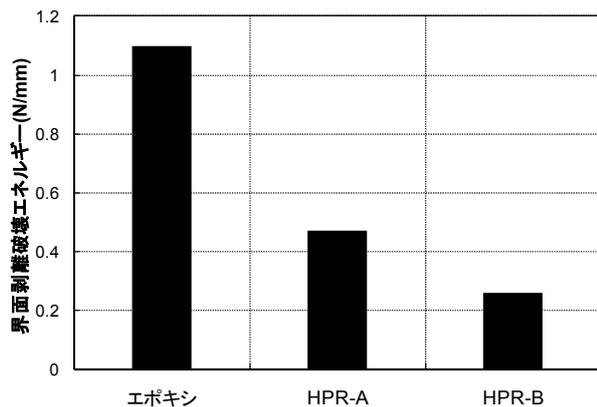


図-7 界面剥離破壊エネルギー

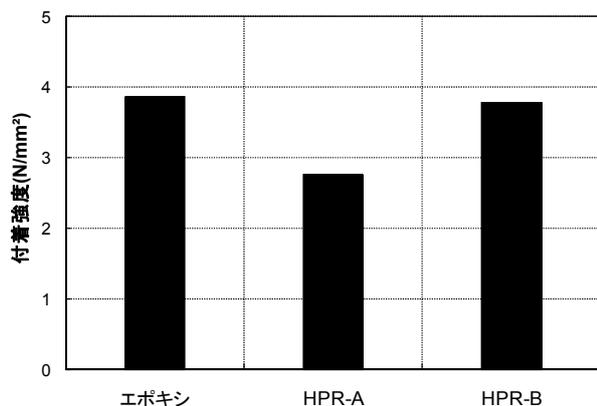


図-8 付着強度

から 250mm まで継手長を変化させた場合、HPR-A、B ともに継手強度が同程度であることが確認できる。これらの結果より、HPR-A はシート同士の界面に生じるせん断力に対して抵抗できるが、HPR-B はせん断力に対する抵抗はほぼ期待できないと考えられた。

(3) 付着試験

界面剥離破壊エネルギーを図-7、付着強度を図-8 に示す。土木学会の指針では、界面剥離破壊エネルギーは試験によらない場合、安全側の値として $G_f = 0.5 \text{ N/mm}$ を用いてよいとされている。本実験では、エポキシと HPR-A は安全側の値を満たしているが、HPR-B は安全側の値の約 1/2 程度であった。しかし、付着強度では、エポキシと HPR-B は同等であり、HPR-A は他と比較して若干低い値であった。界面剥離破壊エネルギーは付着強度と相対変位に囲まれた面積を表す物性値であるが、HPR-A は B と比較して付着強度が小さく、界面剥離破壊エネルギーが大きいことから相対変位は大きい値となる。一方、HPR-B は付着強度が大きく、界面剥離破壊エネルギーが小さいことから相対変位は小さい値となる。これにより、シートとコンクリートの界面に生じるせん断力に対して、HPR-A は変形性能を有しており、HPR-B は変形性能をあまり有していないと考えられた。

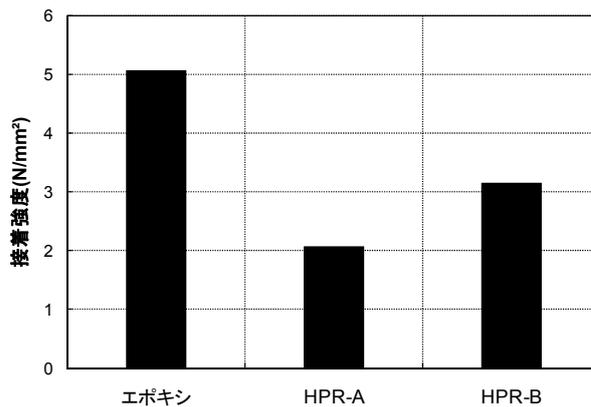


図-9 付着強度

表-3 含浸接着樹脂の特性

種類	引張強度	継手強度	界面剥離破壊エネルギー	付着強度	接着強度
エポキシ	○	○	○	○	○
HPR-A	○	○	△	△	△
HPR-B	○	×	×	○	○

(4) 接着試験

接着強度を図-9 に示す。エポキシは約 5 N/mm^2 と 3 種類の中では最大となり、次いで HPR-B の約 3 N/mm^2 、HPR-A の約 2 N/mm^2 という結果が得られた。HPR-B は HPR-A に比べ、硬い塗膜を形成するため、シートとコンクリートの界面における接着強度が高くなったと考えられた。

(5) 各樹脂の特徴

(1)~(4)の試験より得られた物性値を簡易的にまとめたものを表-3 に示す。なお、エポキシは評価基準としたため全て「○」としている。HPR-A の場合、付着および接着強度はあまり高くないが、せん断抵抗や変形性能を有している。HPR-B の場合、硬い塗膜を形成するため付着および接着強度は高いが、せん断抵抗や変形性能を有しておらず、異なる物性値を示すことが確認された。

3.2 梁載荷試験

表-4 に各試験体耐力の計算値(CAL)および実験値(EXP)を示す。ここで、せん断耐力は土木学会の連続繊維を用いた補修補強指針⁹⁾に基づき式(7)、式(8)により算出した。なお、表-4 に示す V_y は V_c と V_s の和である。

$$V_{fy} = V_c + V_s + V_f \quad (7)$$

ここに、 V_{fy} : 部材のせん断耐力、 V_c : コンクリートが受持つせん断耐力、 V_s : せん断補強筋が受持つせん断耐力、 V_f : 連続繊維シートが受持つせん断耐力

$$V_f = K \cdot [A_f \cdot f_{fu} (\sin \alpha_f + \cos \alpha_f) / s_f] \cdot z \quad (8)$$

ここに、 K : 連続繊維シートのせん断補強効率、 A_f : 区間 s_f における連続繊維シートの総断面積 (mm^2)、 s_f : 連続

表-4 各試験体耐力

試験体 No.	計算値(kN)					実験値(kN)	破壊形態
	V_{FCAL}	V_{SCAL}	V_{VCAL}	V_{ICAL}	V_{IVCAL}	$V_{FEXP}(V_{VEXP})$	
1	255.9	76.8	332.7	-	-	355.7	せん断
2	250.8	76.8	327.6	338.4	666	780.1	
3	258.5	76.8	335.3	376.4	711.7	757.3	
4	255.9	76.8	332.7	373.8	706.5	649.9	



図-10 終局時の破壊状況

繊維シートの配置間隔(mm), f_{fu} : 連続繊維シートの引張強度(N/mm²), α_f : 連続繊維シートが部材軸となす角度(°), z : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材の図心までの距離 (mm)

(1) 破壊性状および繊維シートひずみ

終局時の破壊状況を図-10, 各試験体の繊維シートのひずみ-変位関係を図-11~13, に示す。凡例で示す300mm~900mmは試験体中央からの距離で, 破壊したせん断スパン側のゲージ位置を表している。なお, 試験体は全て引張鉄筋が降伏する前にせん断破壊した。No.1は, 斜めひび割れが圧縮縁に貫通した時点で荷重が低下した(図-14参照)。その後も載荷を継続したが, せん断補強筋のひずみのみが増加し始めたため変位20mmにて試験を終了した。No.2(図-11)は, 変位20mm付近より荷重曲線の傾きが変化するとともに, 繊維シートのひずみが全体的に増加していることから, 繊維シートが荷重を受け持ち始めたと考えられた。その後, 荷重とともに繊維シートのひずみは増加し続け, 変位40mmを超えたところで爆裂と同時にシート破断した(図-10上)。No.3(図-12)は, No.2と同様に, 変位20mm付近より荷重曲線の傾きが変化するとともに, 繊維シートのひずみが全体的に増加している。その後, 変位37mm付近より徐々にシートが破断し, 終局に至った(図-10中)。No.2と比較すると, 繊維シートのひずみが増加していない点, 破壊時の挙動が異なる点が挙げられるが, これは表-3より

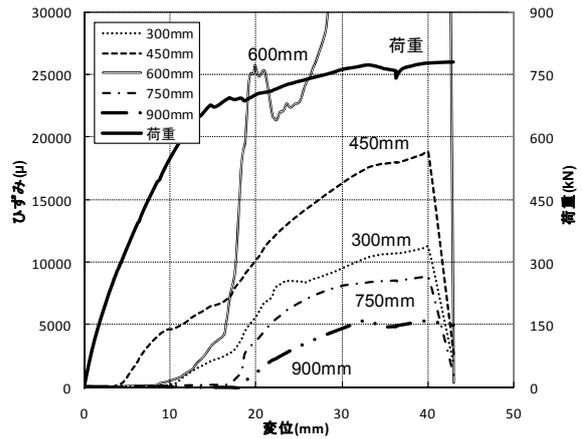


図-11 繊維シートひずみ - 変位関係(No.2)

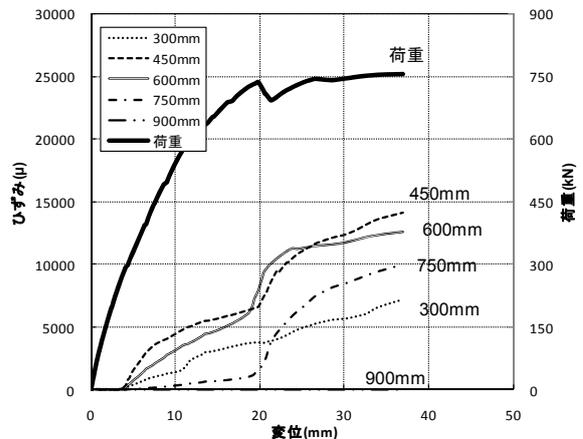


図-12 繊維シートひずみ - 変位関係(No.3)

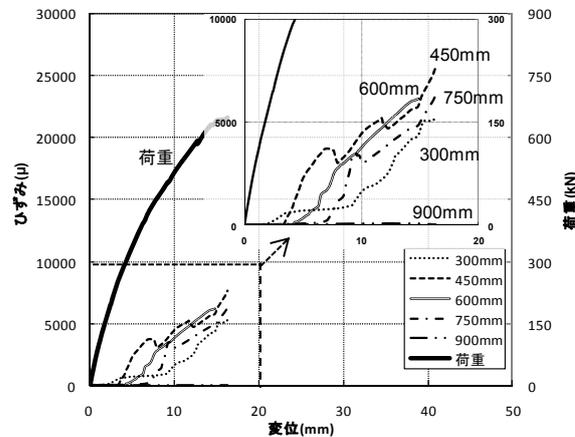


図-13 繊維シートひずみ - 変位関係(No.4)

付着および接着強度の相違が供試体の拘束に影響を及ぼしているためと考えられる。No.4(図-13)は, 変位10mmで繊維シートのひずみが全体的に増加しているが, 変位16mmで継手部が剥離破壊し終局に至った(図-10下)。No.2およびNo.3と比較すると, 変位が小さい段階で繊維シートのひずみが増加し始めているが, 最大で7000μ程度と繊維シートの性能を十分に発揮できずに継手部破壊していることが確認できる。これは表-3より界面剥離破壊エネルギーおよび継手強度を有していないことが要因であると考えられた。

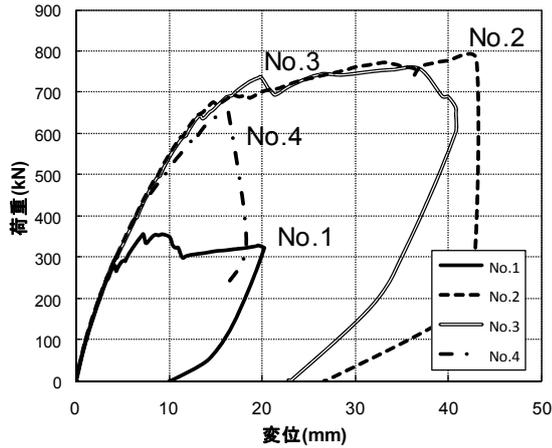


図-14 荷重 - 変位関係

表-5 連続繊維シートが受け持つせん断耐力

試験体 No.	$V_{fEXP} - V_{yEXP}$ (kN)	実験値 / 計算値 V_{fEXP} / V_{fCAL}
	V_{fEXP}	
2	424.4	1.25
3	401.6	1.07
4	294.2	0.79

(2) 荷重 - 変位関係

図-14 に荷重-変位関係を示す。無補強の No.1 と補強有の No.2~4 を比較すると、大幅に最大耐力が向上していることが確認できる。No.2 と No.3 を比較すると、最大耐力および最大変位に若干の差はあるが、ほぼ同様の挙動を示していることが分かる。

(3) 連続繊維シートが受け持つせん断耐力

表-5 に V_{fEXP} および V_f の実験値と計算値の比を示す。 V_{fEXP} は、各試験体のせん断耐力 V_{fyEXP} から無補強試験体のせん断耐力 V_{yEXP} を差し引いた値である。No.2 の場合、1.25 と計算値より安全側に評価できており、No.3 の場合も 1.07 と、No.2 と比較すると僅かではあるが計算値より安全側に評価できている。しかし、No.4 では 0.79 と計算値を下回る結果となった。これは、継手部破壊により連続繊維シートの性能を十分に発揮できなかったためと考えられる。

上述の実験結果より、せん断耐力の向上に含浸接着樹脂の各物性値がどのように貢献しているかまでは把握できなかったが、HPR-A の様に、付着や接着強度があまり期待できなくとも、継手強度が確保されていれば計算値よりも安全側に評価できる。一方、HPR-B の様に、付着や接着強度を有しているが、継手強度が期待できなければ計算値を満足しないと考えられる。

4. まとめ

本研究は、含浸接着樹脂の物性値が連続繊維シートにより補強された RC 梁のせん断耐力に及ぼす影響を把握

するため、各種物性試験により含浸接着樹脂の物性値をまとめ、梁載荷によりせん断耐力を比較した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 樹脂の特性は異なるが、エポキシと HPR-A はほぼ同様の荷重-変位関係を示す。但し、終局時の破壊状況は樹脂の拘束効果が影響していると考えられる。
- (2) せん断耐力の向上を目的とした場合、含浸接着樹脂の特性として、継手強度が樹脂の性能を代表する物性値となる可能性があると考えられる。

謝辞：本研究は、平成 21 年度国土交通省建設技術研究開発助成制度(研究代表者：加藤佳孝)によるものである。また、樹脂を提供していただいたエムシー工業山崎久史氏に、研究実施において、東京大学生産技術研究所技術専門員西村次男氏、元芝浦工業大学小嶋洋範君の協力を得た。ここに記して、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局国道・防災課道路防災対策室，橋梁耐震補強マップ，2006.3.
- 2) 日本コンクリート工学協会，被災構造物の復旧性能評価研究委員会報告書，2007.8
- 3) 笠倉亮太，鈴木将充，小島文寛，伊藤正憲，加藤佳孝，牧剛史：水硬性樹脂を含浸させた連続繊維シートを用いた迅速復旧工法の開発，コンクリート工学，Vol.47，No.12，pp.18-25，2009.12
- 4) エポキシ樹脂技術協会ホームページ，<http://homepage2.nifty.com/epoxygk/>
- 5) 勝木太，丸山久一，睦好宏史，樋口昇：連続繊維シートで補強された部材のじん性率照査式に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，pp.1537-1542，2000.
- 6) 上原子晶久，下村匠，丸山久一：連続繊維シート補強コンクリート部材のせん断耐力の評価法に関する研究，土木学会論文集，No.648，V-47，pp.217-226，2000.5
- 7) 張広鋒，岸徳光，三上浩，澤田純之：AFRP シートせん断補強 RC 梁の耐荷性状に関する実験的パラメータ研究，構造工学論文集，Vol.53A，pp.1040-1049，2007.
- 8) 新保学幸，下村匠，丸山久一，上原子晶久：連続繊維シート補強部材のせん断耐力に関する感度解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，pp.313-318，2000.
- 9) 土木学会，コンクリートライブラリー101 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，2000.7